

# Vaskipuhaltimien fysiikka

Rauli Törnvall

Luk-tutkielma

Oulun Yliopisto

Fysiikan tutkinto-ohjelma

2020

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Ääniaallot</b>	<b>3</b>
2.1	Aaltoliike . . . . .	3
2.2	Aaltofunktio . . . . .	4
2.3	Painevaihtelu ja paineamplitudi . . . . .	6
2.4	Äänen nopeus . . . . .	7
2.5	Äänen voimakkuus, intensiteetti ja desibeliasteikko . . . . .	9
2.6	Superpositioperiaate ja interferenssi . . . . .	10
2.7	Seisovat aallot . . . . .	10
2.8	Musiikin teoria ja fysiikka . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Vaskipuhaltimien fysiikka</b>	<b>13</b>
3.1	Äänen tuottaminen . . . . .	13
3.2	Akustinen impedanssi . . . . .	14
3.3	Seisovat aallot putkessa ja normaalimuodot . . . . .	15
3.4	Vaskipuhallinten toiminta . . . . .	17
3.5	Virittäminen . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>19</b>

# 1 Johdanto

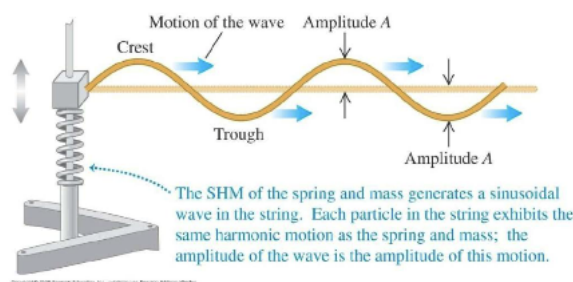
Tämä Luk-tutkielma sai alkunsa, kun halusin yhdistää nuorempana minulle tärkeänä olleen harrastuksen trumpetin soiton ja nykyisen tieteenalani fysiikan, joten sain ideaksi lähteä selvittämään, mitä kaikkia fysikaalisia elementtejä sisältyy musiikkiin ja erityisesti vaskipuhaltimiin. Tutkielmassa perehdytään yleisesti aaltoliikkeeseen ja sen ominaisuuksiin, sekä tutkitaan hieman syvemmin, kuinka nämä ominaisuudet ilmenevät vaskipuhaltimissa ja niissä lähtevässä äänessä. Haluan näin alkuun sanoa siitä, että vaikka nykyajan fysiikka voi selittää, kuinka nämä soittimet toimivat ja kuinka niillä voidaan soittaa halutulla tavalla, suurin osa näistä soittimista on kuitenkin tuhansia vuosia vanhoja. Tuolloin ei vielä tiedetty aaltoliikkeestä eikä sen fysikaalisista vaikutuksista näinkään laajasti kuin nykyään, joten on kai parasta aloittaa juurikin siitä.

## 2 Ääniaallot

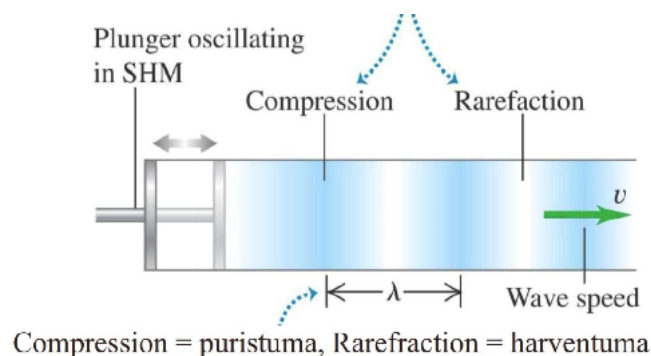
### 2.1 Aaltoliike

Jos halutaan siirtää energiaa paikasta toiseen, se voidaan tehdä esimerkiksi siirtämällä sitä jonkin kappaleen mukana. Esimerkiksi, jos halutaan rikkoa lasi, siihen ei tarvitse koskea fyysisesti vaan voidaan esimerkiksi heittää sitä kivellä. On myös toinen tapa siirtää energiaa ja se on aaltojen avulla. Aallolla tarkoitetaan energian siirtoa ilman materian siirtämistä. Toisin sanoen, aallot eivät siirrä ainetta, vaan aine toimii aallolle väliaineena[1].

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty kaksi erilaista aaltoliikettä, poikittainen ja pitkittäinen aaltoliike. Poikittaisessa aaltoliikkeessä (kuva 1) aalto värähtelee kohtisuoraan aallon etenemissuuntaa vasten. Poikittaisessa aaltoliikkeessä huippu tarkoittaa aallon suurinta eroavaisuutta lepotilasta ylöspäin ja pohja taas suurinta eroavaisuutta lepotilasta vastakkaiseen suuntaan eli alaspäin. Poikittaisesta aaltoliikkeestä hyvä esimerkki on aallot meressä. Meren pinta toimii kuin kuvan 1 naru, kun siihen aiheutetaan häiriö, muodostuu aaltoja.

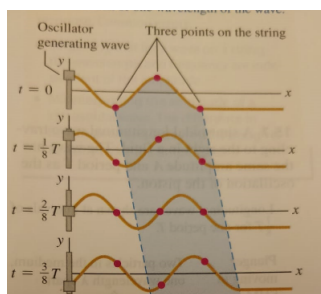


Kuva 1: Poikittainen aaltoliike, Crest = huippu, Trough = pohja, Amplitude = amplitudi.  
[2]



Kuva 2: Pitkittäinen aaltoliike.  $\lambda$  = aallonpituus [2]

Syy siihen, minkä takia vesi ei pakkaannu rannoille vaikka meri aaltoilee, on poikittainen aaltoliike. Kun aalto kulkee väliaineessa eli tässä tapauksessa vedessä, se kuljettaa vesimolekyylejä kohti aallon harjaa ylöspäin ja samalla tavalla kohti aallon pohjaa alaspäin. Vesimolekyyli itsessään ei siirry aallon mukana eteenpäin. Kuvassa 3 nähdään, kuinka narulla olevat kolme pistettä eivät liiku aallon mukana eteenpäin, vaan aalto nostaa ja laskee pisteitä poikittain kulkusuuntaan nähden.



Kuva 3: Poikittaisessa aaltoliikkeessä partikkeli ei liiku aallon mukana, mutta aalto liikuttaa partikkelia poikittain.

Pitkittäisessä aaltoliikkeessä (kuva 2) aallot värähtelevät kulkusuunnan mukaisesti. Pitkittäisessä aaltoliikkeessä huippua vastaa puristuma ja pohjaa vastaa harventuma. Pitkittäistä aaltoliikettä kutsutaan myös paineaalloksi. Paineaalloja on esimerkiksi ääniaallot. Hyvä esimerkki ääniaalloista on äänirauta. Kun äänirautaan kohdistetaan voima, se aiheuttaa ääniraudan molekyyliissä ketjureaktion ja se alkaa värähdellä. Tämä värähtely siirtyy ilmaa pitkin paineaaltona kuulijan korvaan, jossa tärykalvo ja muut korvan osat muuttavat värähtelyn tiedoksi, joka siirtyy aivoihin.[1, 2]

## 2.2 Aaltofunktio

Ääniaalto on väliaineessa tapahtuvaa värähtelyä, joka aiheuttaa väliaineessa painevaihtelutarjan, jossa on vuorotellen puristumia ja harventumia. Ääniaaltoja voidaan kuvaata sinimuotoisina aivan kuin poikittaisia aaltoja, vaikkakin paineaalloissa partikkeli liikkuu aallon kulkusuunnassa. Ääniaaltoja voidaan siis kuvata kaksisuunnaltaan poikkeamana tai painevaihteluna ajan funktiona. Aallon matemaattiseen tarkastelemiseen tarvitaan aaltofunktio. Se kuvaa aallon kulkua tietyssä suunnassa. Se voidaan esittää väliaineessa liikkuvan partikkelin avulla yhtälöllä

$$y(x,t) = A \sin(kx - \omega t). \quad (1)$$

Yhtälössä  $y(x,t)$  kuvaa väliaineen pisteen  $x$  poikkeamaa  $y$  ajanhetkellä  $t$ ,  $A$  on amplitudi, joka kertoo kuinka paljon piste  $x$  enimmillään poikkeaa sen lepotilasta,  $k$  on aaltoluku, joka on muotoa  $\frac{2\pi}{\lambda}$ . Aaltoluku kuvaa, kuinka monta värähdystä aalto tekee pituusyksikköä kohti sekä siinä esiintyvä  $\lambda$  on aallonpituus, joka tarkoittaa kahden huipun, pohjan tai minkä tahansa keskiväliltä löytyvän pisteen ja sitä vastaavan seuraavan pisteen matkaeroa.  $\omega$  on kulmataajuus, joka on muotoa  $2\pi f$  ja tarkoittaa kuinka suuren kulman aalto pyörähtää annetussa ajassa ja siinä mukana oleva  $f$  tarkoittaa taajuutta. Aaltoopin yksi tärkeimmistä yhtälöistä on aaltoyhtälö

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

joka kuvaa etenevää harmonista aaltoa. Kaikki fysikaaliset aallot toteuttavat aaltoyhtälön. Kun kaksi aaltoa, jotka molemmat toteuttavat aaltoyhtälön lasketaan yhteen, niiden muodostama summa-aalto toteuttaa myös aaltoyhtälön. Tästä periaatteesta seuraa kappeleessa 2.6 esiteltävä superpositioperiaate.

Yhtälössä 1 olleen muuttujan  $\omega$  käsittelyssä tuli esille aallon ominaisuus, jota kutsutaan taajuudeksi. Taajuudella, jonka kirjaintunnus on  $f$ , tarkoitetaan kuinka monta aaltoa kulkee yhden pisteen yli sekunnin aikana. Taajuuden yksikkö on Hz eli hertsi. Taajuus määrittää ääniaalloille, kuinka korkeana ääni kuullaan. Yksinkertaisen harmoniselle värähtelylle voidaan laskea taajuus yhtälön

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

avulla. Aaltoliikkeessä jakson aika  $T$  kertoo, kuinka kauan yhdellä kokonaisella aallonpituudella menee kulkea jonkin pisteen ohi. Jaksonaika voidaan laskea taajuuden avulla

$$T = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

Kun halutaan tutkia aaltoja ja niistä syntyviä ääniä, on hyvä tietää aaltoliikkeen nopeus. Se voidaan johtaa nopeuden, eli kuljetun matkan pituuden suhteenä käytettyyn aikaan, kaavasta

$$v = \Delta s / \Delta t, \quad (5)$$

missä  $\Delta s$  on kuljettu matka ja  $\Delta t$  on matkaan kulunut aika. Aallon nopeuden määrittämisessä aaltoliikkeelle kuljettu matka  $\Delta s = \lambda$  ja siihen kulunut aika  $\Delta t = T$ , joten nopeus saadaan muotoon

$$v = \frac{\lambda}{T}. \quad (6)$$

Nyt yhtälön 4 avulla saadaan aallonnopeudelle taajuudesta riippuva yhtälö

$$v = \lambda f, \quad (7)$$

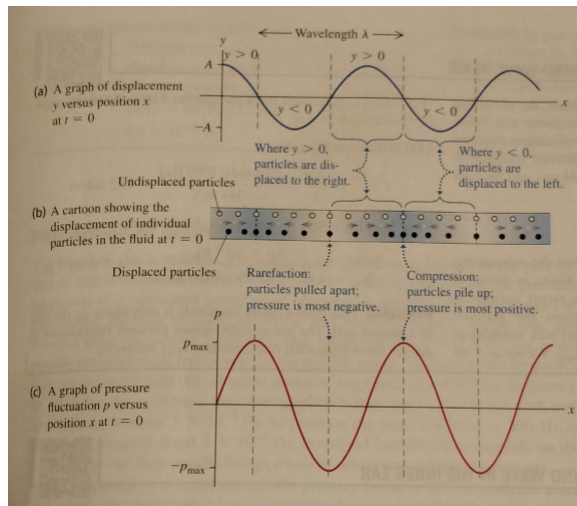
josta saadaan taajuudelle aallon nopeudesta riippuva yhtälö

$$f = \frac{v}{\lambda}. \quad (8)$$

## 2.3 Painevaihtelu ja paineamplitudi

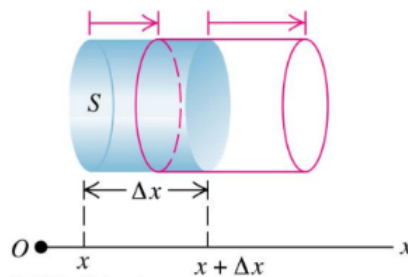
Kappaleessa 2.2 sanottiin, että ääniaaltoja usein kuvataan sinimuotoisena painevaihteluna ajan funktiona (kuva 4). Ääniaallon liikkuesssa ilmassa, harventumissa paine on hieman normaalia pienempi ja tihtentymissä hieman normaalia suurempi. Paineaalloille aaltoyhtälö voidaan johtaa esimerkiksi x-akselin suuntaan etenevän sinimuotoisen aallon avulla

$$y(x,t) = A \sin(kx - \omega t).$$



Kuva 4: a) Aaltofunktio  $y(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$  b) painevaihtelu, c) painevaihtelu paikan funktiona. [2]

Kuvitellaan nyt x-akselin suuntainen sylinteri, jonka pohjan pinta-ala on  $S$  ja pituus  $\Delta x$ . Sylinterin tilavuus  $V = S\Delta x$ . Kun ääniaalto kulkee sylinterin läpi, se siirtää alkupäätä, joka on aluksi pisteessä  $x$ ,  $y_1 = y(x,t)$  verran eteenpäin ja loppupäätä, joka on aluksi pisteessä  $x + \Delta x$ ,  $y_2 = y(x + \Delta x, t)$  verran eteenpäin. Nyt ääniaalto muuttaa siis kuvitteellisen sylinterin



Kuva 5: Kuvitteellisen sylinterin tilavuuden muutos [2].

tilavuutta

$$\Delta V = S(y_2 - y_1) = S(y(x + \Delta x, t) - y(x, t)), \quad (9)$$

jolloin tilavuuden suhteellinen muutos on

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{(y(x + \Delta x, t)) - (y(x, t))}{\Delta x}. \quad (10)$$

Koska ääniaalto muuttaa sylinterin tilavuutta, täytyy määritellä tilavuuden muutosta vastustava voima. Tälle voimalle on määritetty puristusvakio  $B$  ja se kuvaa väliaineen kykyä vastustaa tilavuuden muutosta. Kun  $V$  on tilavuus ja  $p$  on paine, puristusvakio  $B$  on muotoa

$$B = -V \frac{dp}{dV}. \quad (11)$$

Kun  $\Delta x \rightarrow 0$  saadaan

$$\frac{dV}{V} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{y(x + \Delta x, t) - y(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \quad (12)$$

Tästä saatu tulos voidaan nyt sijoittaa puristusvakion yhtälöön 11. Yhtälössä paineen muutosta kuvaava  $dp$  on muotoa  $dp = p(x, t)$ . Näin paineen vaihtelulle saadaan yhtälö

$$p(x, t) = -B \frac{\partial y(x, t)}{\partial x}. \quad (13)$$

Yhtälössä 13 oleva  $\frac{\partial y(x, t)}{\partial x}$  on aaltofunktion 1 derivaatta, jolloin painenvaihtelun kautta johdettu aaltofunktio saadaan muotoon

$$p(x, t) = BkA \cos(kx - \omega t), \quad (14)$$

jossa  $p(x, t)$  kuvaa paineen muutosta pisteessä  $x$  ajanhetkellä  $t$  ja  $B$  on puristusvakio. Kun käsitellään paineenmuutoksesta johtuvaa aaltoliikettä, yhtälöstä 14 voidaan päätellä, että  $p(x, t)$  saa suurimman arvon kun  $\cos(kx - \omega t) = 1$ , jolloin  $BkA$  viittaa paineen maksimimutokseen, jota kutsutaan paine amplitudiksi. Paineamplitudin  $p_{max}$  yhtälö on

$$p_{max} = BkA, \quad (15)$$

missä  $B$  on puristusvakio,  $k$  on aaltoluku ja  $A$  on amplitudi. Koska  $k$  on muotoa  $\frac{2\pi}{\lambda}$ , voidaan yhtälöstä päätellä, että mitä pienempi aallonpituus paineaallolla on, sitä suurempi on sen paineamplitudi. Myös puristusvakio vaikuttaa paine amplitudiin. Mitä suuremman arvon  $B$  saa, sitä suurempi pitää paineamplitudin olla, koska kappale vaatii enemmän voimaa tilavuudenmuutosta varten.[1, 2]

## 2.4 Äänen nopeus

Äänen nopeus on suurin kiinteissä aineissa (lähes 6000 m/s), hitaampi nesteissä (noin 1200 m/s) ja hitain kaasuissa. Syy siihen, minkä takia ääni kulkee nopeiten kiinteissä aineissa, on niiden tiheys. Ääniaallot värähtävät väliainetta, joten mitä tiheämpi väliaine on, sitä vähemmän sen osasten tarvitsee värähtää, että aalto pääsee liikkumaan seuraavaan partikkeliin. Ääniaallon nopeuksille eri väliaineissa on eri yhtälöt. Nesteille yhtälö on muotoa

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}, \quad (16)$$

missä  $v$  on äänen nopeus väliaineessa,  $B$  on puristusvakio ja  $\rho$  on väliaineen tiheys. Kiinteille aineille yhtälö on muotoa

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}, \quad (17)$$

missä  $Y$  on Youngin moduuli ja se kertoo, kuinka paljon jokin kappale muuttaa pituuttaan, kun siihen kohdistetaan voima.

Viimeisenä on ääniaallon nopeus ideaalikaasussa. Ideaalikaasua käsiteltäessä voidaan ajatella, että ääniaallon kulkeminen väliaineessa on adiabaattinen prosessi eli aallon kulkemisessa ei siirry lämpöenergiaa. Tällöin kaasulle voidaan määrittää yhtälö

$$pV^\gamma = \text{vakio}, \quad (18)$$

jossa  $\gamma$  kuvaa vakiopaineessa ja vakiolämpötilassa ominaislämpökapasiteettien suhdetta  $\frac{C_p}{C_V}$ .

Derivoimalla yhtälö 18 tilavuuden  $V$  suhteen voidaan ratkaista  $dp/dV$

$$\frac{dp}{dV}V^\gamma + \gamma pV^{\gamma-1} = 0 \Leftrightarrow \frac{dp}{dV} = -\frac{\gamma pV^{\gamma-1}}{V^\gamma} = -\frac{\gamma p}{V}. \quad (19)$$

Sijoittamalla yllä oleva yhtälöön 11 saadaan puristusvakioksi  $B = \gamma p$ . Yhtälön 16 avulla nopeudeksi siis saadaan

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}. \quad (20)$$

Ideaalikaasulle tilanyhtälö on muotoa

$$pV = nRT, \quad (21)$$

missä  $p$  on paine,  $V$  on kaasun tilavuus,  $n$  on kaasun ainemäärä,  $R$  on kaasuvakio ja  $T$  on kaasun lämpötila. Kun ainemäärä kirjoitetaan muotoon  $n = \frac{m}{M}$  ja ratkaistaan yhtälöstä paine  $p$  saadaan

$$p = \frac{m}{V} \frac{RT}{M}. \quad (22)$$

Yhtälöstä  $\frac{m}{V}$  on sama kuin kaasun tiheys  $\rho$ , joten yhtälö saadaan lopulliseen muotoon

$$p = \rho \frac{RT}{M}. \quad (23)$$

Nyt yhdistämällä kaavat 20 ja 23 saadaan äänen nopeudelle kaasussa yhtälö

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (24)$$

jossa  $R$  on kaasuvakio,  $T$  on väliaineen lämpötila ja  $M$  on aineen moolimassa. Ilmassa ääni kulkee nopeudella

$$v = 331 \frac{m}{s} + (0.6 \frac{m/s}{C})T \quad (25)$$

Kaavan osa  $+$  merkin oikealla puolella on lämpöfaktori. Se osoittaa, että äänennopeus nousee  $0.6m/s$  jokaista noussutta lämpöastetta kohti.[1, 2]



## 2.5 Äänen voimakkuus, intensiteetti ja desibeliasteikko

Ääniaallot, kuten muutkin aallot, kuljettavat mukanaan energiaa. Tätä aallon kuljettamaa energiaa kuvataan aallon intensiteetillä  $I$ . Intensiteetti määritellään yleensä fysiikassa tehona  $P$  pinta-alaa  $A$  kohden. Jos äänilähteet ovat pistemäisiä, niistä lähtevät ääniaallot jakautuvat tasaisesti pallomaiselle alueelle. Tämän takia intensiteetti on muotoa

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}. \quad (26)$$

Tästä yhtälöstä nähdään, että intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyden  $r$  neliöön. Tämän verrannollisuuden avulla saadaan yhtälö, jolla voidaan määrittää äänen intensiteetti jossain tietyssä pisteessä

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (27)$$

Ihmiskorva voi havaita ääniä intensiteetti välillä  $10^{-12} \text{ W/m}^2 - 1 \text{ W/m}^2$ . Koska tämä väli on niin valtava, käytetään äänen intensiteetin kuvaamiseen logaritmista desibeliasteikkoa. Desibeliasteikossa käytetään vertailuintensiteettinä kuulokynnystä  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Intensiteetit voidaan muuttaa desibeliasteikolle yhtälöllä

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}. \quad (28)$$

Koska asteikko on rakennettu kymmenkantaisen logaritmin avulla, tarkoittaa se sitä, että jos asteikolla nousee 10 dB intensiteetti kymmenkertaistuu. Kuvassa 6 on esitetty joitain yleisiä ääniä ja niiden voimakkuuksia. Kuvassa näkyvä kipukynnys ei ole aina 130 dB vaan siihen voi vaikuttaa yksilölliset erot ja olosuhteet. Kipukynnys on kuitenkin yleisimmin 120 dB ja 140 dB välillä. Kuvassa näkyvät pianissimo ja fortissimo ovat musiikissa käytettäviä termejä. Pianissimo tarkoittaa hyvin hiljaa soittamista ja fortissimo tarkoittaa hyvin voimakkaasti soittamista.

Source	Intensity	Intensity level	× TOH
Threshold of hearing (TOH)	$10^{-12}$	0 dB	1
Whisper	$10^{-10}$	20 dB	$10^2$
Pianissimo	$10^{-8}$	40 dB	$10^4$
Normal conversation	$10^{-6}$	60 dB	$10^6$
Fortissimo	$10^{-2}$	100 dB	$10^{10}$
Threshold of pain	10	130 dB	$10^{13}$
Jet take-off	$10^2$	140 dB	$10^{14}$
Instant perforation of eardrum	$10^4$	160 dB	$10^{16}$

Table 1.1 from [Müller, FMP, Springer 2015]

Kuva 6: Eri äänenvoimakkuuksia. [5]

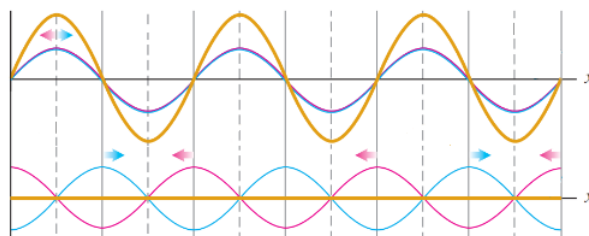
Logaritmisella asteikolla ihmisen kuulokynnyseltä siirtyminen kipukynnykselle eli nostamalla desibelitasoa 140 dB tarkoittaa sitä, että intensiteetti kasvaa kertoimella  $10^{14}$ , joka siis on 100 triljoona kertainen kuulokynnyksen intensiteettiin verrattuna. [1, 2]

## 2.6 Superpositioperiaate ja interferenssi

Superpositioperiaatteella tarkoitetaan sitä tapahtumaa, kun kaksi tai useampia ääniaaltoja kulkee saman väliaineen läpi. Jos kaksi aaltoa on samassa väliaineen pisteessä  $x$  amplitudien ollessa hyvin pieniä, kokonaisaaltofunktio pisteessä  $x$  voidaan laskea molempien aaltojen aaltofunktioiden summana

$$y = y_1(x, t) + y_2(x, t). \quad (29)$$

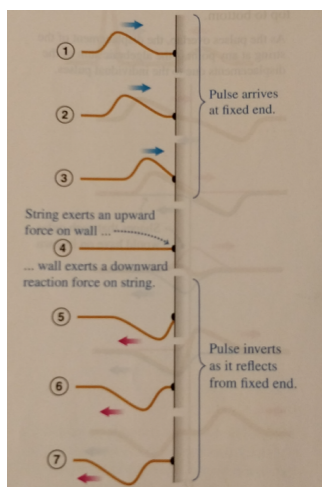
Jotta yhtälö 29 toteutuu, pitää amplitudien olla pieniä, koska jos amplitudi kasvaa, se johtaa väliaineen elastisuuden menettämiseen eli väliaine muuttaa muotoa. Kun kaksi aaltoa kulkee saman pisteen kautta yhtäaikaan esimerkiksi narussa, ne aiheuttavat toisiinsa interferenssiä. Interferenssiä voi olla kahta erilaista kuten kuvassa 7. Aaltojen amplitudit narun pisteissä voivat olla saman merkkisiä ja vahvistavat toisiaan, eli luovat **konstruktiivista interferenssiä** tai aaltojen amplitudit narun pisteissä voivat olla eri merkkisiä ja vaimentavat toisiaan luoden **destruktiivista interferenssiä**. [1, 2]



Kuva 7: Täysin samassa vaiheessa olevat aallot (konstruktiivinen interferenssi) ja täysin eri vaiheissa olevat aallot (destruktiivinen interferenssi)[2]

## 2.7 Seisovat aallot

Käydään tässä kappaleessa läpi seisovat aallot narussa, joka on kiinni molemmista päistä. Tätä sovelletaan myöhemmin, kun puhutaan seisovista aalloista putkissa.



Kuva 8: Narussa kulkeva aalto osuu seinään ja heijastuu takaisin.[2]

Kuvassa 8 on esitettyä naru, joka on kiinni toisesta päästä. Kun naruun tehdään aalto, aalto kulkee naru pitkin kunnes se osuu seinään. Koska naru ei voi liikuttaa seinää, sillä seinä vastustaa liikettä, aalto heijastuu takaisin mutta väärinpäin. Tämä johtuu siitä, kun naru osuu kiinnityskohtaan, se aiheuttaa siihen voimaa. Tässä tapauksessa kiinnityskohta ei liiku, ja aiheuttaa naruun yhtäsuuren, mutta vastakkaissuuntaisen voiman.

Jos naru kiinnitetään molemmista päistä, ja asetetaan narussa kulkemaan aalto, oikealle kulkevat aallot ja heijastuneet vastakkaissuuntaiset aallot aiheuttavat superpositioperiaatteen nojalla naruun seisovan aallon kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 9: Oikealle kulkevasta aallosta ja heijastuksesta syntynyt seisova aalto narussa.[2]

Kuvassa N kuvaa solmukohtaa, jossa tapahtuu destruktiivinen interferenssi ja A kuvaa kupua, jossa tapahtuu konstruktivinen interferenssi.[2]

## 2.8 Musiikin teoria ja fysiikka

Musiikin soittamisessa taajuuksien sijaan puhutaan sävelistä. Sävelen sijainti sävelasteikolla kertoo soittajalle mikä ääni pitää tuottaa. Sävelet, toiselta nimeltään nuotit, ovat suomenkielisessä musiikkiteoriassa

$$c, c\sharp, d, d\sharp, e, f, f\sharp, g, g\sharp, a, b, h$$

$$c, d\flat, d, e\flat, e, f, g\flat, g, a\flat, a, b, h.$$

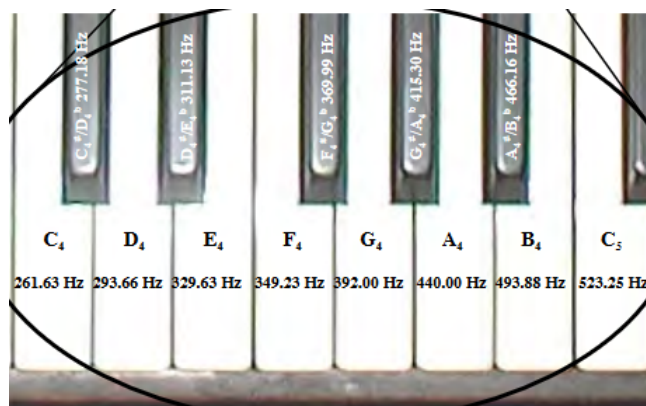
Ylemmällä rivillä olevat nuotit on muodostettu käyttäen *ylennyksiä* ja alemmalla rivillä käyttäen *alennuksia*. Englannin kielisessä musiikkiteoriassa nuotit kirjoitetaan isoin kirjaimin ja h:n tilalla on B. Alla on englannin kieliset nuotit kirjoitettuna alennuksilla

$$C, D\flat, D, E\flat, E, F, G\flat, G, A, B\flat, B.[4]$$

Ylennettyjen nuottien taajuudet ovat hieman korkeampia kuin niitä vastaavien perusnuottien ja alennettujen nuottien taajuudet ovat hieman matalampia kuin niitä vastaavien perusnuottien. Päällekkäisten nuottien taajuudet ovat teoreettisesti samat. Siirryttäessä nuotilta toiselle, siirrytään tietyn *intervallin* verran alemmas tai ylemmäs nuottiasteikolla. Kun siirrytään yhden nuotin verran jompaankumpaan suuntaan, siirrytään puolisävelaskelta eli intervalli, joka siirrytään on pieni sekunti. Jos siirrytään kaksi puolisävelaskelta, eli sävelaskeleen verran, intervalli on suuri sekunti. Jokainen musiikkiteoriassa käytetty nuotti voi luoda sille oman *sävelasteikon*. Tämä sävelasteikko koostuu seitsemästä eri nuotista. Yksinkertaisin ja luultavasti tunnetuin sävelasteikko on C-duuriasteikko. Siinä ei ole yhtään ylennystä eikä alennusta. C-duuriasteikko muodostuu nuoteista

$$c, d, e, f, g, a, h, c'.$$

Asteikon viimeinen nuotti on sama kuin ensimmäinen, mutta se on oktaavin korkeammalla. Oktaavi on yleisesti käytetyistä intervaleista suurin ja tarkoittaa 12 puolisävelaskelta. Oktaavin fyysikaalinen merkitys on taajuuden tuplaaminen.



Kuva 10: Pianon koskettimet  $c_4 - c_5$ . [1]

Kuvassa 10 on esitettynä pianon koskettimilta  $c_4 - c_5$ . Ensimmäistä nuottia  $c_4$  kutsutaan keski c:ksi, koska se löytyy pianon koskettimista keskeltä. Kuvasta löytyy myös nuotti  $a_4$ . Sen taajuudeksi on määritetty  $440.00\text{ Hz}$  ja sen mukaan yleisesti kalibroidaan kaikki muut nuotit ja soittimet. Yleisin taajuus johon äänirudat kalibroidaan on juurikin  $440\text{ Hz}$ . Oktaavin sisällä kaikkien muiden nuottien taajuudet voidaan johtaa alla olevan kuvan 11 mukaisesti. [1, 3]

Note change	Frequency ratio
$C \rightarrow D$	9/8
$D \rightarrow E$	10/9
$E \rightarrow F$	16/15
$F \rightarrow G$	9/8
$G \rightarrow A$	10/9
$A \rightarrow B$	9/8
$B \rightarrow C$	16/15

Kuva 11: Oktaavin sisältämien nuottien taajuuksien suhteet. [1]

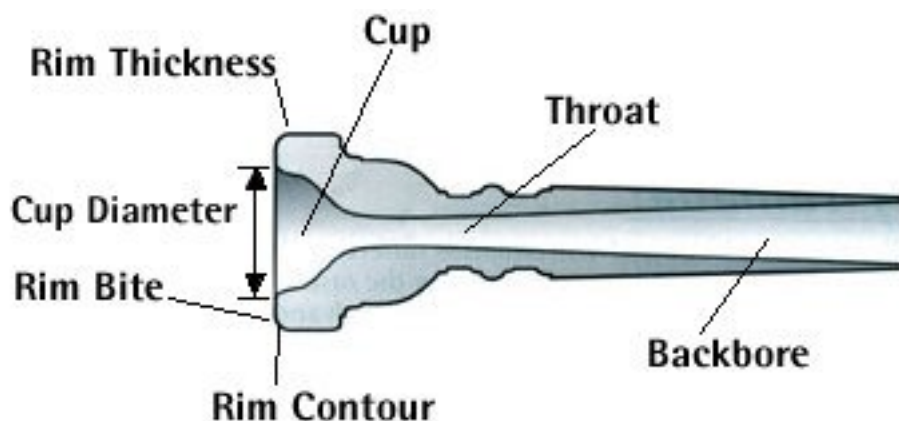
Korva on herkkä noin 10 oktaaville:  $20\text{ Hz} \rightarrow 40\text{ Hz} \rightarrow 80\text{ Hz} \rightarrow 160\text{ Hz} \rightarrow 320\text{ Hz} \rightarrow 640\text{ Hz} \rightarrow 1280\text{ Hz} \rightarrow 2560\text{ Hz} \rightarrow 5120\text{ Hz} \rightarrow 10240\text{ Hz} \rightarrow 20480\text{ Hz}$ . Ihmiskorvalle on määritetty ”Just Noticeable Difference” (JND) eli juuri huomattava ero.  $2000\text{ Hz}$  taajuudella JND on noin  $2\text{ Hz}$ ,  $4000\text{ Hz}$  taajuudella noin  $10\text{ Hz}$  ja niin edespäin.  $500\text{ Hz}$  taajuudella JND on  $1\text{ Hz}$ , joka tarkoittaa sitä, että jos kuuntelisit kahta ääntä,  $500\text{ Hz}$  ja  $501\text{ Hz}$ , voisit erottaa ne selvästi kahdeksi eri ääneksi.

## 3 Vaskipuhaltimien fysiikka

Aloitetaan vaskipuhaltimien fysikaalinen tutkiminen äänen tuottamisesta. Miten saadaan aikaan musiikkia, kun soittimeen puhalletaan ilmaa. Entä miten ilma käyttäytyy soittimen sisällä, kun siihen tehdään työtä? Miten ilmaa voidaan manipuloida, jotta saadaan tuotettua uusia ääniä ja sointuja?

### 3.1 Äänen tuottaminen

Äänen tuottaminen vaskipuhaltimella toimii samalla periaatteella kuin puupuhaltimilla. Puupuhaltimissa on niin sanottu mekaaninen ruoko. Syy, miksi näistä soittimista saadaan ääntä, joka on ihmisen kuulotaajuudella on juurikin tämä ruoko. Kun ruoko asetetaan puupuhaltimen suukappaleeseen ja siihen puhalletaan ilmaa, soittimen runkoon muodostuu korkeapaine, joka painaa ruokon kiinni suukappaletta vasten, luoden suljetun putken. Putkeen laitettu paineaalto kulkee putken toiseen päähän, jossa akustinen impedanssi putken sisällä vallitsevan korkean paineen ja huoneen normaalin paineen välillä on suuri ja paineaalto heijastuu takaisin mutta negatiivisena, alipaine aaltona. Tämä alipaineaalto kulkee nyt takaisin suukappaleelle ja heijastuu putken päästä takaisin kohti avonaista päätä. Siellä tapahtuu taas sama heijastus, mutta alipaine muuttuu nyt taas paineaalloksi. Kun tämä paineaalto saavuttaa suukappaleen, se työntää ruokoa auki ja antaa soittajan taas puhaltaa soittimeen, joka taas aiheuttaa ruokon kiinni menemisen.[1]



Kuva 12: Trumpetin suukappale. Rim = reuna, cup = kuppi, throat = kurkku, backbore = takaporaus[9].

Tämä sama efekti saadaan luotua vaskipuhaltimiin huulilla. Kun soittaja puhaltaa ilmaa soittimeen suukappaleen läpi, hän samalla painaa huulensa yhteen oikealla määrällä painetta, jolloin saadaan aikaan huulien ”pärinää”. Tämä pärinä on samaa taajuusluokkaa kuin ruokon värähtely suukappaleessa ja aiheuttaa siten samanlaisen suljettuputki efektin vaskipuhaltimiin. Suukappaleen muoto ja koko vaikuttaa äänen laatuun ja sen tuottamiseen hyvin vahvasti. Suukappaleet, joissa on suuri kuppi suosivat enemmän matalia ääniä, ja pienet kupit korkeita ääniä. Sama pätee suukappaleen kurkkuun (throat). Mitä leveämpi kurkku, sitä matalampia ääniä suukappale suosii. Myös takaporaus (backbore) vaikuttaa

soitettaviin ääniin. Mitä leveämpi takaporaus on, sitä suurempia aallonpituuksia eli matalampia ääniä se suosii. Ohut takaporaus taas suosii korkeampia ääniä, joilla on pienempi aallonpituus. Suukappaleen muilla osilla vaikutetaan enemmän soittamiseen itsessään, mitä ohuemmat ja terävämmät suukappaleen reunat ovat, sitä enemmän painetta huuliin voidaan saada ja sitä suurempia taajuuksia saadaan huulien pärinälle. Mutta ohuet reunat vähentävät soittamisaikaa, sillä ne painavat huuliin myös vahvemmin. Paksut reunat vaikeuttavat korkeiden äänien soittamista, mutta pidentävät mahdollista soittoaikaa, sillä ne ovat hellempää soittajalle.[1]

### 3.2 Akustinen impedanssi

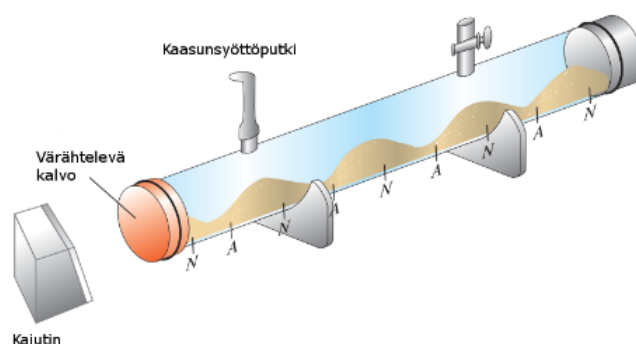
Mitä jäykempi väliaine, sitä vähemmän siihen vaikuttava voima muuttaa sen muotoa. Akustisella impedanssilla tarkoitetaan sitä määrää energiaa mikä tarvitaan siirtämään väliainetta tietty matka. Tälle saadaan arvo kaavalla

$$Z = \frac{p}{U} \quad (30)$$

missä  $Z$  = impedanssi,  $p$  = paine ja  $U$  = tilavuuden nopeus eli kuinka paljon kaasua kulkee aikayksikköä kohden. Kun aalto kohtaa impedanssin muutoksen, osa siitä tai jopa koko aalto heijastuu takaisin. Hyvä esimerkki on kitaran kieli. Kun kitaran kieli kohtaa kitaran päässä olevan pultin, impedanssi ero on niin suuri, että se heijastaa lähes koko aallon takaisin. Tämä heijastuminen ylläpitää seisovaa aaltoa. [1, 6]

### 3.3 Seisovat aallot putkessa ja normaalimuodot

Koska tutkielmassa keskitytään ainoastaan vaskipuhaltimiin, jotka käyttäytyvät suljetun putken tavoin, käydään tässä kappaleessa läpi ainoastaan suljetussa putkessa esiintyviä seisovia aaltoja. Kun ääniaallot etenevät putken sisällä, ne kimpoavat putken päästä takaisin. Näin syntyy vastakkaisiin suuntiin kulkevia aaltoja, jotka superpositioperiaatteen nojalla muodostavat putken sisälle seisovia aaltoja. Seisovat aallot saavat putkessa olevan ilmapatsaan värähtelemään ja täten luovat ääniaaltoja. Seisovia aaltoja suljetussa putkessa voidaan tutkia demonstraatiolla, jossa käytetään Kundt'n putkea. Kundt'n putki on noin



Kuva 13: Kundt'n putki. [2]

metrin mittainen vaakatasossa oleva lasinen putki, jonka toisessa päässä on joustava kalvo, joka voi värähdellä, ja toisessa päässä jäykkä korkki. Putken pohjalle on asetettuna hienojakoista jauhetta ja putki täytetään kaasulla. Kalvon eteen asetetaan kaiutin, jonka taajuutta voidaan säädellä vapaasti. Kun kaiutin laitetaan päälle, aiheuttaa se kalvossa värähtelyä. Värähtely tuottaa putkeen ääniaaltoja, jotka heijastuvat suljetusta päästä ja muodostavat putkeen seisovia aaltoja.

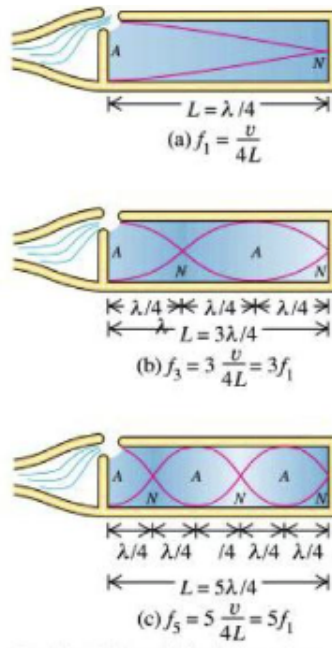
Suljetussa putkessa olevalla seisovalla aallolla on aallonpituus  $\lambda$ . Putken pituus voidaan määrittää katsomalla, miten aalto asettuisi putken sisälle. Jotta putkessa oleva ilmapatsas pääsisi liikkumaan, pitää putken suljetussa päässä sijaita solmu ja avonaisessa päässä kupu. Jos putken molemmissa päissä olisi solmukohdat, ilmapatsas ei pääsisi ulos putkesta. Soittamisen kannalta tämä olisi hyvin epäkäytännöllistä sillä soittimesta ei tällöin lähtisi ääntä. Jotta tällainen asettelu olisi mahdollista, putken pituuden tulee olla jokin aallonpituuden neljänneksen pariton moninkerta, sillä aallonpituuden parittomassa neljäsosassa avoimessa päässä on kupu, aivan kuten kuvassa 14. Kuvasta 14 myös nähdään, että jos putken pituus olisi aallonpituuden neljäsosan parillinen moninkerta, olisi putken molemmissa päissä solmukohdat.

Kuvan 14 ylimmässä kohdassa olevaa taajuutta  $f_1$  kutsutaan soittimen perustaajuudeksi eli ensimmäiseksi moodiksi. Ensimmäisen moodin taajuudeksi saadaan, kun soittimen eli putken pituus on

$$L = \frac{\lambda}{4}. \quad (31)$$

Tästä voidaan muokata aallonpituudelle yhtälö

$$\lambda = 4L. \quad (32)$$



Kuva 14: Seisova aalto suljetussa putkessa.[2]

Yhdistämällä yhtälöt 8 ja 32 saadaan perustaajuudeksi

$$f_1 = \frac{v_{aani}}{4L} \quad (33)$$

Putkessa oleva seisova aalto voi asettua kuvan 14 keskimmäisen kohdan tavoin. Tätä kutsutaan toiseksi yläsäveleksi eli toiseksi moodiksi. Toiselle yläsävelille taajuus saadaan laskettua samalla tavalla, mutta nyt

$$L = \frac{3}{4}\lambda. \quad (34)$$

Toisen yläsävelen aallonpituus on

$$\lambda = \frac{4}{3}L \quad (35)$$

ja taajuudeksi saadaan

$$f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v_{aani}}{\frac{4}{3}L} = \frac{3v_{aani}}{4L} = 3 \cdot f_1. \quad (36)$$

Korkeammille yläsävelille taajuudet lasketaan samalla tavalla. Putken pituus on aina jokin aallonpituuden neljäsosan pariton moninkerta, jolloin moodin taajuus kasvaa myös parittomalla kertoimella. Tästä saadaan suljetun putken aallonpituudelle ja taajuudelle yleiset kaavat

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad (37)$$

ja

$$f = n \frac{v}{4L} \quad (38)$$

kun  $n=1,3,5,\dots$  [2, 7]



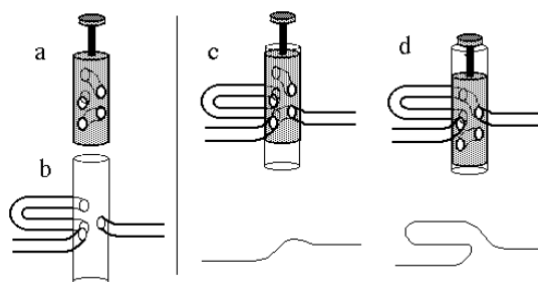
### 3.4 Vaskipuhallinten toiminta

Moderneilla vaskipuhalltimilla on yleensä kaksi eri toimintatapaa, kuinka niillä soitettua ääntä voidaan muokata. On venttiili soittimia kuten trumpetti, käyrätorvi ja tuuba ja sitten on vetoputkella toimiva vetopasuuna.



Kuva 15: Trumpetti, tuuba, käyrätorvi ja vetopasuuna. [8]

Venttiilisoittimien toimintaperiaate on, että jokaisessa venttiilissä on jousella varustettu painin ja metallinen putki, johon on kaiverrettu kaksi kulkureittiä ilmalle. Kun venttiili on lepoasennossa, ilma kulkee lyhintä mahdollista reittiä soittimen läpi. Kun venttiili painetaan alas, ilma kulkee eri reittiä, joka on hieman pidempi.

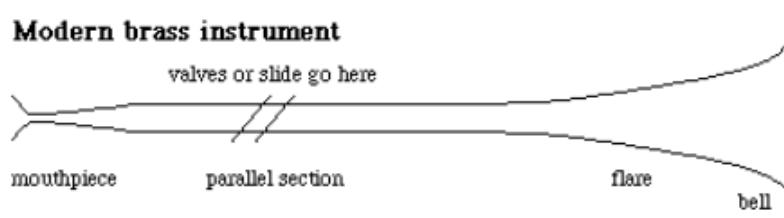


Kuva 16: Mäntäventtiilin toimintaperiaate.[10]

Kuten kappaleessa 3.3 käsiteltiin, muuttamalla soittimen pituutta, voidaan suoraan vaikuttaa siitä lähtevän äänen taajuuteen. Venttiilien painalluksia voidaan yhdistellä ja pidentää äänen kulkemaa reittiä, jotta voidaan tuottaa kaikki musiikkiin tarvittavat nuotit. Vetopasuunassa ei ole venttiilejä ollenkaan, mutta siihen kuuluu pitkä vetoputki, jota liikuttamalla muutetaan soittimen pituutta ja täten ilman kulkemaa matkaa.

Vaskipuhalltimissa soittimesta saatavaan ääneen vaikuttaa vahvasti suukappale ja soittimen kello. Suukappaleen fysikaalinen toiminta perustuu siihen, että se tuo korkeimpia ääniä alemmalle taajuudelle. Kaikilla suukappaleilla on ominaistaajuus, jota kutsutaan poksahdus taajuudeksi. Tämä nimitys tulee siitä, että kun suukappale irrotetaan soittimesta, ja sen kuppiosaa lyödään avonaista kämmentä vasten, lähtee poksahduksen tapainen ääni, jonka

taajuus on noin 840 Hz. Suukappale tuo alemmas kaikkia soitettuja taajuuksia, jotka ovat tämän ominaistajuuden yläpuolella.[2]



Kuva 17: Yksinkertaistettu kuvaus modernista vaskipuhaltimesta.[10]

Soittimen kello-osan toimintaperiaate on vastakkainen suukappaleen kanssa. Kello-osan tarkoituksena on tuoda matalia soitettuja taajuuksia ylöspäin. Kellon muoto myös vaikuttaa tietyn taajuisiin seisoviin aaltoihin. Vaskipuhaltimilla matalilla taajuuksilla olevat seisovat aallot ovat hyvin vahvoja. Tämä johtuu siitä, että matalilla taajuuksilla olevien ääniaaltojen aallonpituus on kellon kaarevuuteen verrattuna niin suuri, että ne eivät pysty seuraamaan sitä. Tämän takia ne heijastuvat helpommin takaisin soittimeen vahvistaen seisovaa aaltoa.[10] Koska pitkät aallot eivät voi seurata kellon muotoa, ne kohtaavat akustisen impedanssin muutoksen hyvin nopeasti, jonka takia ne heijastuvat takaisin. Korkeat taajuudet, joiden aallonpituus on pienempi, seuraavat aukeavaa kelloa helpommin. Mitä pidemmälle kelloon aallot pääsevät kulkemaan, sitä helpommin ne lähtevät soittimesta ulos äänenä. Koska lyhyet aallot (korkeat taajuudet) seuraavat kellon kaarevuutta helpommin, ne kohtaavat impedanssin muutoksenkin hitaammin eivätkä heijastu niin helposti takaisin soittimeen. [11]

### 3.5 Virittäminen

Vaskisoitinten virittäminen tapahtuu viritysputkilla, joita soittimissa on enemmän tai vähemmän riippuen venttiilien määrästä. Vaskipuhaltimien virittäminen tapahtuu pääviritysputkella, joka on ennen venttiileitä. Tätä osaa siirtämällä voidaan hienosäätää soittimen pituutta ja täten sen tuottaman äänen korkeutta. Venttiilin toiminta perustuu putken pituuden muuttamiseen ohjaamalla ilmapirta kulkemaan pidempää reittiä kuin ilman venttiilien painamista. Tätä varten jokaiseen vänttiiliin on kiinnitetty lisäputki, johon ilma ohjataan venttiiliä painettaessa. Näissä putkissa on myös liikkuva osa, *triggeri*, jolla soitettavan nuotin taajuutta voidaan hienosäätää. Triggereissä on sormille koukut, joiden avulla niitä voidaan liikuttaa soittamisen aikana. Tämä on siksi, että vaikka pääviritysputkella saadaan muutettua kaikkien soitettavien nuottien taajuuksia, jos yksi tai useampi nuotti on hieman ylä- tai alavireinen, voidaan se korjata liikuttamalla triggeriä.

## 4 Yhteenveto

Kun huomioidaan se, milloin vaskipuhaltimet on alunperin luotu ja saatu toimimaan halutulla tavalla ilman nykyajan fysiikkaa ja kaikkea tietoa mitä sen mukana tulee, ei voi kuin ihailla ihmisiä, jotka ne kehittivät. Kun tiedetään, miten ääniaallot käyttäytyvät tietyssä väliaineessa ja kuinka nämä aallot vaikuttavat kappaleisiin, jotka ovat niihin kontaktissa, voidaan ymmärtää soittimien toiminnan perusteet. Fysiikan avulla voidaan selittää kaikki, mikä soittamiseen liittyy, paineaallon luomisesta äänen kuulemiseen asti ja kaikkeen mitä siinä välillä tapahtuu. Nykyajan fysiikka auttaa meitä ymmärtämään, miten soittimet toimivat, miten jokin muutos soittimen muotoon, sen rakennusmateriaaliin, suukappaleen muotoon tai soittimen kellon muotoon vaikuttaa sen tuottamaan ääneen. Voimme jopa tutkia muinaisten soitinten toimintaa ja niiden muodostamaa ääntä kun voimme tutkia soitinten rakennusmateriaalin ominaisuuksia ja täten tietää minkä äänien kanssa se on resonoinut.

## Viitteet

- [1] David R. Lapp, Fellow Wright Center for Innovative Science Education Tufts University Medford, ”**The physics of music and musical instruments**”.
- [2] Hugh D. Young, Roger A. Freedman, ”Sears and Zemasky’s University Physics with Modern Physics Fourteenth Edition” Pearson Education Limited 2016
- [3] Markku Pohjola, ”Soitinten fysiikka” Pro Gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, 2016
- [4] L. Gunther ”The Physics of Music and Color”, Springer, 2012
- [5] [https://www.audiolabs-erlangen.de/resources/MIR/FMP/C1/C1S3\\_Dynamics.html](https://www.audiolabs-erlangen.de/resources/MIR/FMP/C1/C1S3_Dynamics.html) viitattu 16.10.2020
- [6] ”Acoustic impedance, intensity and power”, School of Physics, Sydney, Australia <https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/sound-impedance-intensity.htm> viitattu 24.9.2020
- [7] Joe Wolfe, ”Open vs Closed pipes (Flutes vs Clarinets)”, <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/flutes.v.clarinets.html> viitattu 15.1.2020
- [8] <https://infovisual.info/en/music/brass-instruments> viitattu 15.1.2020
- [9] <https://bobgillis.wordpress.com/2013/03/03/some-thoughts-on-trumpet-mouthpieces-what/> viitattu 24.9.2020
- [10] Brass instrument (lip reed) acoustics: an introduction <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/brassacoustics.html>, viitattu 16.10.2020
- [11] The physics of the trumpet, Boštjan Berkopec, seminaari, Ljubljana, 2013  
[http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2013\\_2014/The\\_physics\\_of\\_the\\_trumpet\\_\(Bostjan\\_Berkopec\).pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2013_2014/The_physics_of_the_trumpet_(Bostjan_Berkopec).pdf), viitattu 16.10.2020